

## スマートAEセンサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング (その1) スマートAEセンサによる損傷検出システムの概要

○柳瀬高仁<sup>1)</sup>・米山健一郎<sup>2)</sup>・池ヶ谷 靖<sup>3)</sup>

- 1) 正会員 ジャスト 調査診断第二部, 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 2-4-1, yanase@just-ltd.co.jp
- 2) 正会員 大林組 原子力本部, 東京都港区港南 2-15-2, yoneyama.kenichiro@obayashi.co.jp
- 3) 正会員 ジャスト 調査診断統括部, 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 2-4-1, Ikegaya@just-ltd.co.jp

### 1 はじめに

構造物の維持管理において、老朽化に対する構造健全性や大地震直後の構造安全性を監視するヘルスマニタリング手法・技術の確立は重要な課題である。

本報は、RC造建物を対象とした構造ヘルスマニタリングの実用化を目的とし、スマートAEセンサ<sup>1)</sup>を用いた損傷検出システムの、現時点での可能性と課題を整理する。なお、AE (acoustic emission) とは材料の破壊によるエネルギー放出が波動となって伝播する現象をいう。

(その1)ではヘルスマニタリングに関する基本的な方針とスマートAEセンサの概要及びRC造柱部材の静的載荷実験<sup>1)</sup>で得た特性を記す。(その2)・(その3)では、RC4層建物模型振動台実験<sup>2), 3)</sup>で取得したAEセンサのデータと各部の加速度や変位、荷重履歴との対応を分析し、モニタリングの可能性を検討する。ここでは低ひずみレベルにおける局所的損傷検知を目的としたローカル・モニタリングと、建物全体の振動特性の変動に着目したグローバル・モニタリングによる損傷評価を扱う<sup>4)</sup>。

### 2 モニタリングの基本方針

構造健全性を監視する現状の方法は、検査員による目視点検が主である。但し突発的な災害に備えて検査員を確保するために少なからぬコストを要し、多くの部位を検査するのに長い時間を必要とする。それに対して安価なセンサを用いたヘルスマニタリングにより損傷検出を行うことができれば、構造物の安全確保にかかるコストの低減が期待できる。モニタリングで計測すべき項目には、構造物各部の変位、加速度、ひずみやAE等が挙げられる。

従来のAE法によるRC造構造物の損傷検出は、部材に取り付けた複数のセンサで亀裂発生時の超音波を検出し、それらのデータをコンピュータで解析して損傷位置を正確に同定するものであり、高価で複雑なシステムを必要とした。しかし構造物の健全性評価では、損傷の発生位置を正確に特定することより、損傷の発生を確実に検出できること、さらに損傷程度を合理的に把握し定量化できることの方が重要である。そこで、損傷発生位置をセンサ周囲の領域とし、AE波が閾値を超える単位時間当たりの

頻度を検出することにより、ノイズと信号の弁別及び損傷程度の評価を行うシステムを開発した<sup>1)</sup>。

### 3 スマートAEセンサによる損傷検出システム

開発した損傷検出システムは、AE波の受信、波形処理及びデータ送信の機能を有するスマートAEセンサと、データの収録とモニタリングを行う記録装置から構成される。写真1に示したスマートAEセンサは、センサ部、データ処理部及び通信部を1枚の基板上に集約し、大きさが約20mm×90mmのジュラルミン製のケースに入れたものである。

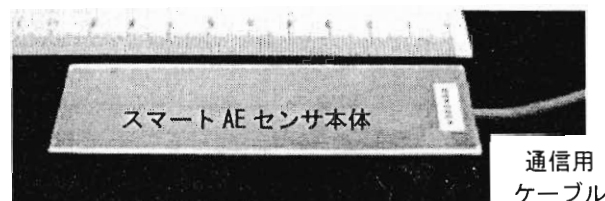


写真1 スマートAEセンサ外観

スマートAEセンサの特徴を以下に示す。

- ①小型の基板内に損傷検出・データ処理・通信の全ての機能が集約されている。
- ②センサ部には、小型化と感度の確保を目的として、従来のセラミック振動子ではなくコンポジット振動子を使用する。
- ③センサ上でAE波が閾値を超える単位時間当たりの頻度を計算し、それを損傷程度の指標とする。なお、サンプリング時間は100 $\mu$ 秒とする。
- ④閾値は4段階設定し、ノイズとの弁別を図る。
- ⑤通信するデータは、時刻と頻度のデジタル値とし、扱うデータ量を極力少なくする。

スマートAEセンサはデータ処理の機能を内蔵しているため、記録装置へのデータ通信には種々の方法が考えられる。現状は記録装置と通信媒体にそれぞれパソコンとUSBを用いるタイプ(SAEMII, 写真2)、メモリとツイストペア線を用いるタイプ(SAEMIII, 写真3)を使用している。その他LAN(有線、無線)や電話線などを利用する方法もある。

モニタリング用のパソコンとスマートAEセンサの接続にこれらの方法を複合して使い、建物全体の損傷状態をモニタリングするイメージを図1に示す。各階のスマートAEセンサからの情報は、階ごとまたは数階ごとに設けたパソコンを経由して防災

センターに送信される。さらに、そのデータはインターネット経由で遠隔地の防災拠点に転送され、構造物の損傷状態を遠隔地からリアルタイムにモニタリングできる。

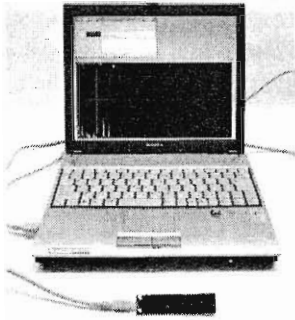


写真2 SAEMII 外観

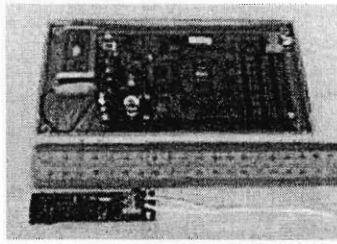


写真3 SAEMIII 外観

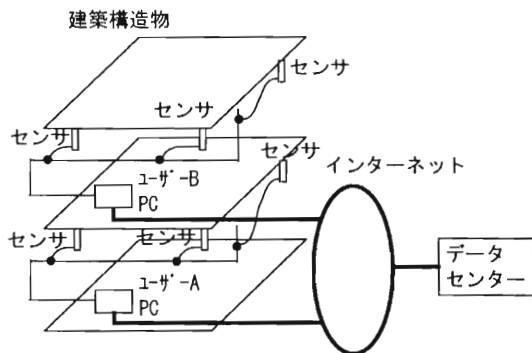


図1 建物全体のモニタリングのイメージ

#### 4 RC柱部材の静的載荷実験

スマートAEセンサによる損傷検出システムの基礎データを得るため、実物の1/2縮尺のRC造柱部材の静的載荷実験に適用した。せん断破壊するように鉄筋量及び強度を設定した試験体の形状及び配筋図を図2に示す。スマートAEセンサは図3に示すように、加力方向と直交する面の中央高さ位置に貼り付けた。センサはSAEMIIを用い、AE波が閾値を超える1.0秒当りの頻度(AE計数)をデータとして収集しモニタリングを行った。

試験体は、載荷初期にせん断ひび割れが発生し、変形角が15/1000rad.時に最大荷重を示した。それ以降は、せん断ひび割れの幅が大きく開き耐力低下を起こした。AE計数と変形角との関係を図4に示す。AE計数は、せん断ひび割れ発生時に最初に確認され、ひび割れ本数の増加及びひび割れ幅の増大に伴い多くなっていった。しかし、最も多くのAE計数を観測したのは、せん断ひび割れ発生時であった。これに対して最大荷重時付近では、単位時間当たりのAE計数は多くないが、変形の大きさに関わらず断続的に計数が観測されている。すなわちひび割れの開閉またはずれによりAE波が断続的に発生していると推察される。また同じ変形での繰り返し加力時のAE計数は少なく、カイザー効果(材料が経験

した最高応力以下ではAEが発生しない現象)が認められる。

#### 5 まとめ

RC造建物を対象とした実用的な構造ヘルスマニタリングに供するため、AEセンサで測定したデータを直ちに処理し、モニタリングする上で重要な情報のみをパソコンに送信する損傷検出システムを開発した。同システムを用いたRC造柱材の静的載荷実験により、閾値を超えるAE計数を指標にして、せん断ひび割れの発生から破壊付近までの損傷検出が可能であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 柳瀬, 池ヶ谷, 林他: 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 195-196, 2004.
- 2) 勝俣, 白井, 壁谷澤, 壁谷澤, 関: 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-3, 407-410, 2005.
- 3) 圓, 池ヶ谷, 米山他: 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 23-28, 2005.
- 4) 濱本: 性能評価のためのヘルスマニタリング技術, 建築防災, 9-15, 2004.7.

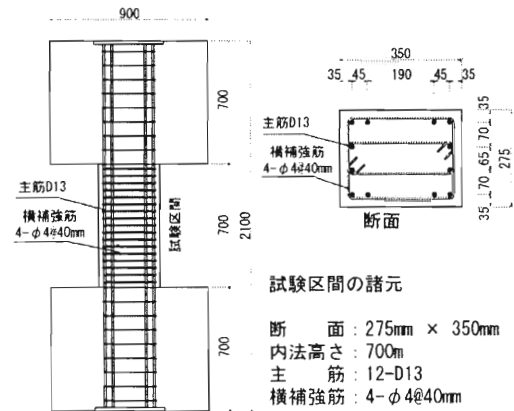


図2 試験体形状及び配筋



図3 スマートAEセンサ設置状況

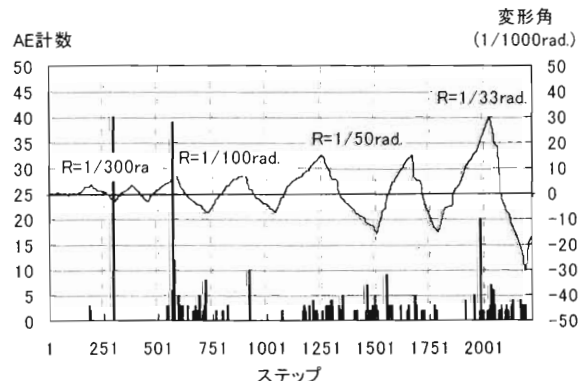


図4 変形角とAE計数の推移

## スマートAEセンサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング (その2) ローカル・モニタリングによるRC建物模型の損傷検知

○米山健一郎<sup>1)</sup>・勝俣英雄<sup>2)</sup>・池ヶ谷 靖<sup>3)</sup>

- 1) 正会員 大林組 原子力本部, 東京都港区港南 2-15-2, yoneyama.kenichiro@obayashi.co.jp  
 2) 正会員 大林組 技術研究所, 東京都清瀬市下清戸 4-640, katsumata.hideo@obayashi.co.jp  
 3) 正会員 ジャスト 調査診断統括部, 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 2-4-1, ikegaya@just-ltd.co.jp

### 1 ローカル・モニタリング

構造ヘルスマニタリングでは、目に見える大きな損傷より、むしろひずみレベルの小さな損傷の発生を逃さずに検知する能力が要求される。また健全な初期状態との比較において、損傷の度合いを定量化することにより、建物の補修や補強の必要性に関する判断が可能となる。

対象とする建物について、損傷部位があらかじめ想定される場合には、その位置にセンサを配して部材の変状を記録することが効果的である。(その1)で示したスマートAEセンサによる損傷検出システムは、このようなローカル・モニタリング<sup>1)</sup>に適した技術と考えられる。本論ではその有効性を、RC4層建物模型振動台実験で確認する。

### 2 RC4層建物模型の振動台実験

文部科学省委託防災科研大大特プロジェクト<sup>2)</sup>の一環で実施した振動台実験<sup>3)</sup>において、スマートAEセンサによるデータを取得した。実験では多方向地震動入力を受けるRC建物の応答・破壊性状を把握するため、実規模の1/4スケール、1×3スパン壁フレーム試験体(写真1)に対し、1995年JMA神戸波のNS、EW、UD各成分の加速度時刻歴を相似則に従い時間軸で1/2に圧縮した波を入力とした。

試験体は中央スパン片側に有開口壁、張間方向片側に袖壁を擁し、これら耐震壁要素の偏在から生ずるねじれ振動を抑制すべく張間逆側には腰壁付き短柱を有する不整形な構造である。なお多方向入力波は図1に示すように、水平方向の主軸が試験体のスパン(y)方向に対応するように45°回転させている。RC模型が損傷から破壊に至る過程を詳細に把握するため、原波を係数倍しRun1~9まで5、20、40、60、80、100、125%(Run7以降)の振幅で段階的に加振した。

実験では加速度計、変位計、ロードセル、ひずみゲージ等により、各部の物理量を計測している。スマートAEセンサは写真1および図2に示すように、ひび割れの発生が予想される最下層有開口壁および柱脚部に配置した。4段階の閾値を持つAEセンサのサンプリング時間刻みは100μ秒であり、データ収録するAE頻度はSAEMIIタイプ(図2の青丸印)で0.1秒間、SAEMIII(同赤丸印)で1.0秒間毎の計数とした。

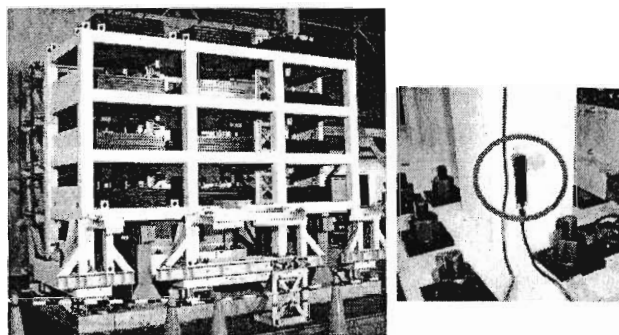


写真1 RC建物模型振動台実験とスマートAEセンサ

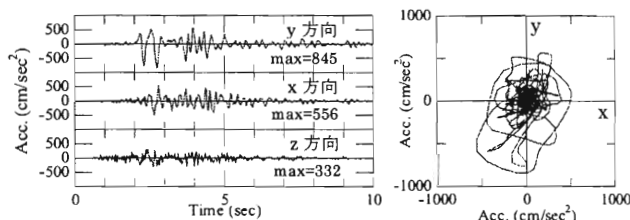


図1 入力波時刻歴とオービット

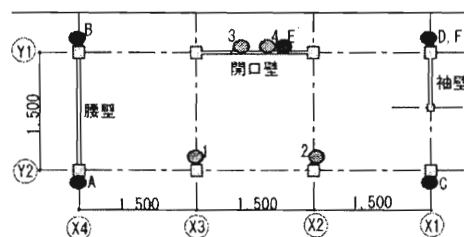


図2 スマートAEセンサの設置箇所

### 3 初期ひび割れ発生段階でのAEセンサの反応

Run1 (5%入力) では試験体外観に変状は見られず、AEセンサにも反応はなかった。

Run2 (20%入力) では、最下層腰壁および袖壁に微小なひび割れが目視で僅かに認められ、腰壁・短柱位置での短辺方向最大層間変形角は約1/1540であった。この加振時のセンサA(腰壁部)およびセンサE(有開口壁部)が捉えたAE計数の時間的変化を、センサ設置位置における層間変位絶対値と比較し図3に示す。凡例(TH1~TH4)は閾値を示し、計測感度はTH1からTH4へ段階的に低くなる。両センサ共、層間変位が増大する時刻にAE計数が大きく、最も感度の高い(閾値の小さい)場合(TH1)には変形角が約1/2000以上で初期ひび割れを検知し

ている。このことから、処理するデータ量を最小限に抑えたスマートAEセンサでも、ひずみレベルの小さな損傷の発生を充分かつ的確に検知できることが確認できる。また、今回の動的実験でAEセンサが反応したひずみレベルは、(その1)で示したRC柱材の静的載荷実験時に比べ小さな値となっているが、これは載荷条件の差、柱材と壁材の変形状の違い等によるものと考えられる。

#### 4 加振レベルに応じたAEセンサの反応

Run2~Run4 (原波の20~60%入力) 加振時の各センサ設置位置における層せん断力-層間変形関係と、各時間ステップでのAE計数との比較を図4に示す。(AE頻度をドットの大ききさで示している)。いずれも変形が増し履歴ループのふくらむステップでAEが発生している。また加振レベルに応じた応答の増大とAEセンサの反応が良く対応している。

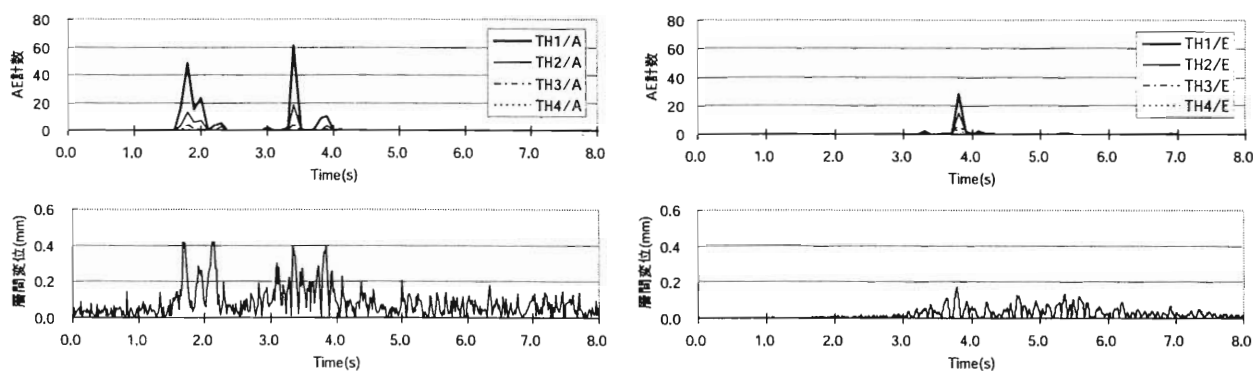


図3 AE頻度と層間変位絶対値の比較(RUN2,20%入力)  
(左:センサA(腰壁)、右:センサE(有開口壁))

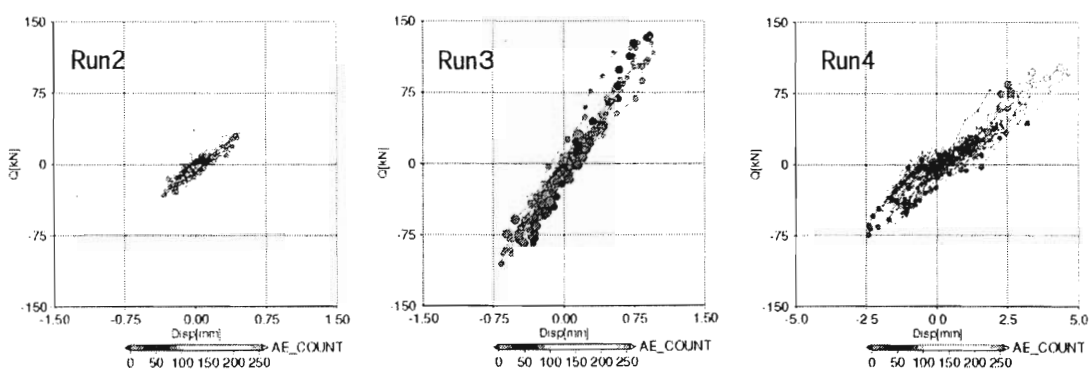


図4 AE係数と壁のせん断履歴の関係 (センサA:腰壁)

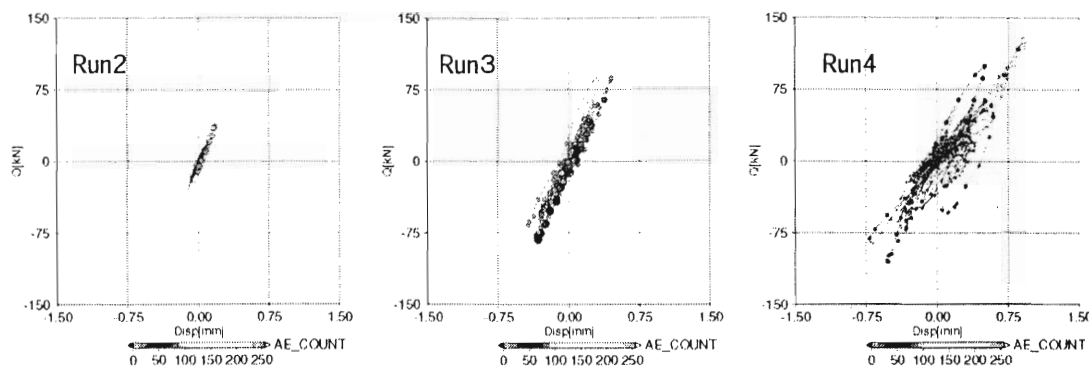


図5 AE係数と壁のせん断履歴の関係 (センサE:有開口壁)

目視で最も早期にひび割れの発生を確認した腰壁部のセンサAでは、特にRun3においてセンサE(開口壁)のAE計数を大きく上回っている。

#### 5 まとめ

コンクリートの初期ひび割れが発生する小さな地震入力レベルにおいても、スマートAEセンサによる損傷検知が効果的であること、同センサを用いたシステムの地震前後におけるローカル・モニタリングへの適用が十分に可能であることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 濱本:性能評価のためのヘルスマニタリング技術, 建築防災, 9-15, 2004.7.
- 2) 文部科学省、防災科研:文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトII 振動台活用による構造物の耐震性向上研究シンポジウム予稿集, 2004.7.
- 3) 勝俣、白井、壁谷澤、壁谷澤、関:日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, 407-410, 2005.

## スマートAEセンサを用いたRC建物の構造ヘルスマニタリング (その3) グローバル・モニタリングによるRC建物模型の損傷評価

○白井和貴<sup>1)</sup>・柳瀬高仁<sup>2)</sup>・圓 幸史朗<sup>3)</sup>・中村 充<sup>4)</sup>

- 1) 非会員 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター,  
兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21, shirai@bosai.go.jp
- 2) 正会員 ジャスト 調査診断第二部, 神奈川県横浜市青葉区あざみ野南 2-4-1, yanase@just-ltd.co.jp
- 3) 非会員 大林組 原子力本部, 東京都港区港南 2-15-2, en.koshiro@obayashi.co.jp
- 4) 非会員 大林組 技術研究所, 東京都清瀬市下清戸 4-640, nakamura.mitsuru@obayashi.co.jp

### 1 グローバル・モニタリング

大規模な建物や複雑な構造物などでは、地震により損傷を受ける部位を予測することが難しく、(その2)で述べたローカル・モニタリングに多大な労力とコストが必要となる。このような問題に対処する方策として、比較的少数のセンサで建物全体の損傷状態を推定するグローバル・モニタリングが望まれる<sup>1)</sup>。

本論では、(その2)に記したRC4層建物模型振動台実験<sup>2)</sup>で計測した各部の加速度データから、加振レベルの増大に伴う試験体の振動特性の変動を抽出する。これは実際の建物に対する地震時のグローバルな振動モニタリングを想定した検討である。さらに(その2)図2に配置を示したスマートAEセンサによるデータを分析し、試験体動特性の変動や損傷の進展との関係を考察する。

### 2 損傷の進展に伴う固有振動数の変動

実験では各階の床スラブ上に水平・上下3成分の加速度計を数点設置して時刻歴データを収録している。ここでは床スラブ上の加速度計をモニタリング用センサと考える。

地震入力レベルを段階的に上げた各 Run 終了後に、試験体動特性の変化を把握するため、低振幅レベルでのホワイトノイズ加振を実施している。ホワイトノイズ加振及び地震波加振の結果から得られた試験体図心位置(屋上階、2階)の、振動台に対するy方向の伝達関数の推移を図1に示す。

ホワイトノイズ加振(左図)では、Runが進むにつれて1次の固有振動数が約6Hz(Run2)から2Hz(Run6)程度、2次振動数が25Hz(Run2)から9Hz(Run6)程度まで低下することが、それぞれ屋上階及び2階の結果に現れ、損傷の進行に伴う剛性の低下が確認できる。地震波入力時(右図)においても、増幅のピークを示す振動数が入力レベルの増大に伴い低下する傾向はホワイトノイズ加振時と同じであるが、入力が比較的小さいRun4までは屋上階での伝達関数の卓越があまり明瞭でない。

両加振時共に、2階(下図)の伝達関数は、Run

が進むにつれてピークが緩やかになり、減衰が大きくなる傾向を示した。一方、屋上階(上図)については、Runが進むにつれてピークが鋭敏となり、見かけ上の減衰が小さくなった。これは、損傷の進行に伴い励起されたねじれ振動の影響によるものと考えられる。これより、減衰の推移をモニタリングする上では、各加振レベルを通して並進動が支配的である2階の結果を用いる方が適当と考えられる。なお、振動台のロッキングによる影響については、振動台の回転加速度に高さに乗じて求めた並進成分を除去することにより、補正を試みたが、屋上階の伝達関数はほとんど変わらなかった。

### 3 損傷モードとAE計数

入力の増大と建物模型が受ける損傷の進行に伴い、建物全体の動的挙動が変化する。その結果が固有振動数の推移として現れるが、ここではさらに、最下層の柱及び有開口壁・腰壁脚部に配置したスマートAEセンサの応答から建物各部の損傷進展の差異(損傷モード)を評価する。加振レベルに応じたセンサ設置位置による反応の違いを図2に、センサ周辺の最終ひび割れ状況を写真1に示す。

ひび割れが早期に生じた腰壁・短柱フレームの柱脚部(A、B)では、Run5までの早期の段階で他の部位よりAE頻度が高い。加振が進み変形・損傷の進展するRun4あたりから、開口壁(E)での反応が顕著になりRun7でピークを迎える。一方、センサBの頻度は既にRun5以降で低減の傾向を示す。これらに対して損傷が比較的少ない袖壁フレーム(C、F)では頻度が小さく、両者は同程度の結果を示す。(その2)で述べたように、加振レベルの小さいRun2・Run3あたりでも、センサの位置に応じた反応の違いが明らかである。

センサA(腰壁)及びセンサE(有開口壁)の入力レベルの増大に伴うAE計数の閾値別の推移を図3に示す。両センサ共に、各閾値でのAE計数は概ね相似形を示しておりノイズの影響は見られない。

### 4 まとめ

加速度計とスマートAEセンサを用いた振動特

性の抽出及び損傷モードの把握により、グローバルな振動モニタリングが可能であることが確認できた。なお、今回、明瞭な卓越ピークを示さなかった低レベル入力時においては、振動特性の明確な変動の抽出が今後の課題に挙げられる。

参考文献

- 1) 濱本：性能評価のためのヘルスマニタリング技術，建築防災，9-15，2004.7.
- 2) 勝俣、白井、壁谷澤、関：日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1，407-410，2005.
- 3) 圓、池ヶ谷、米山他：日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2，23-28，2005.

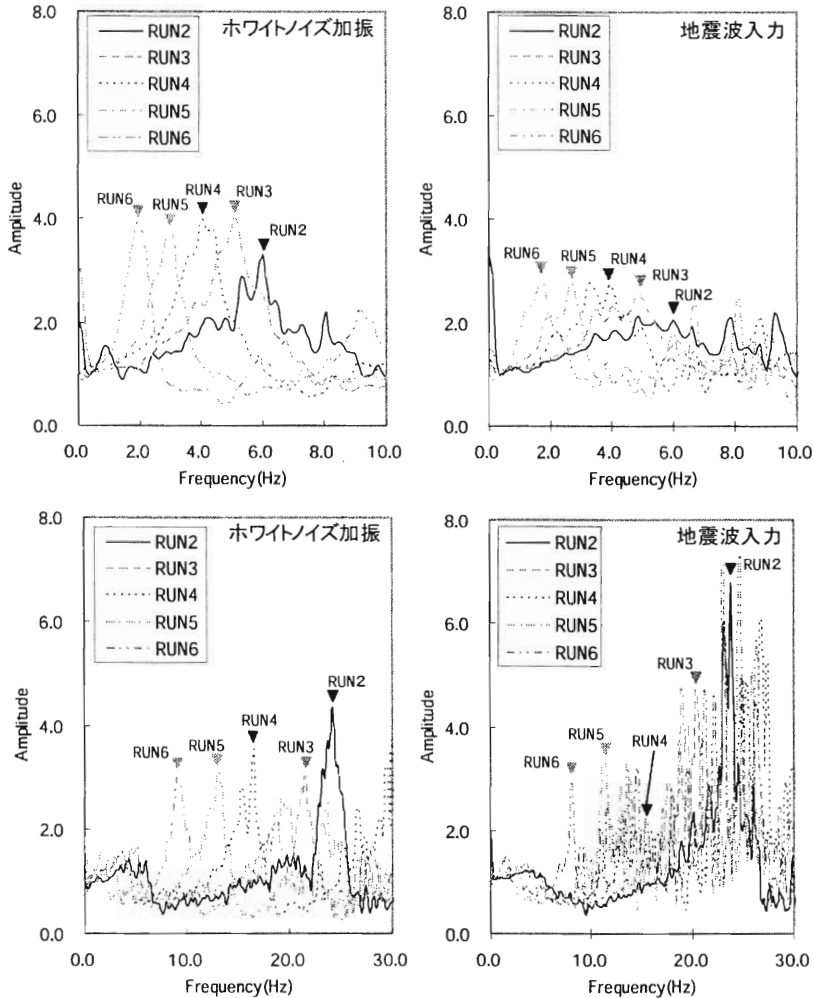


図1 ホワイトノイズ加振時及び地震波入力時の伝達関数の推移 (上：屋上階/振動台、下：2階/振動台)

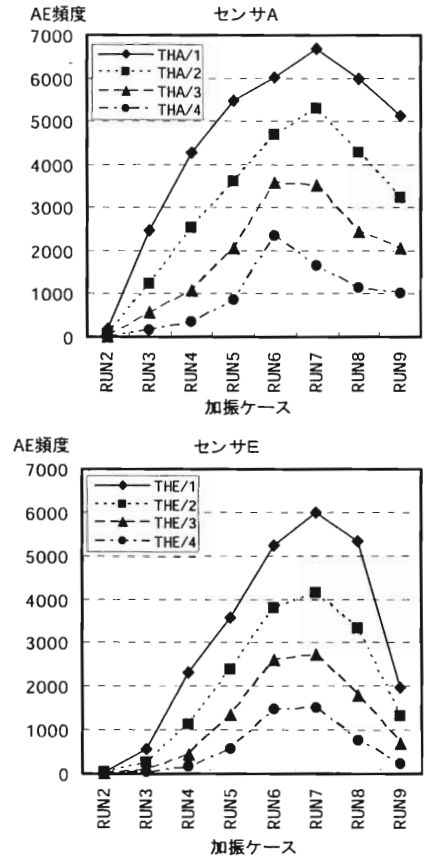


図3 入力レベルに応じた AE 頻度の推移 (上：センサ A、下：センサ E)

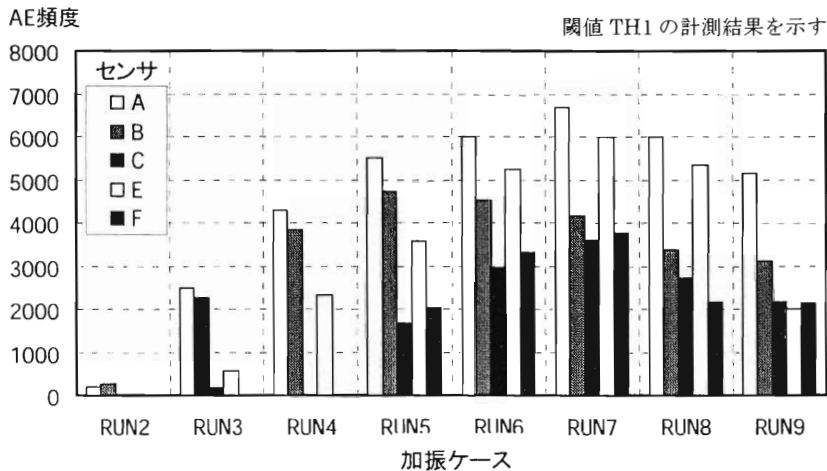


図2 入力レベルに応じた AE 頻度の推移 (スマート AE センサ貼付位置の違いによる反応)

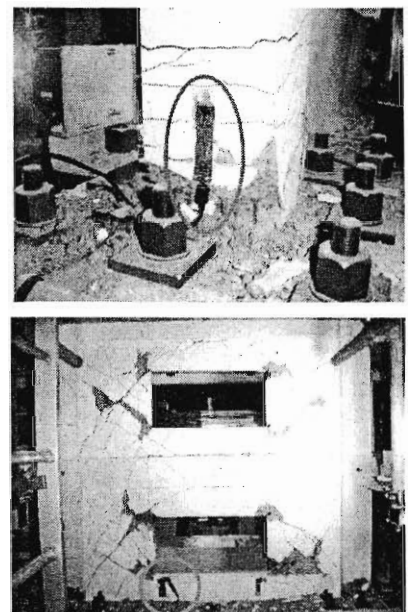


写真1 センサ設置周辺の模型ひび割れ状況 (上：センサ A、下：センサ E)